

## ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕКСТУРЫ В ПОЛУФАБРИКАТАХ ИЗ МЕДИ

*Ю.Н. Логинов, В.В. Котов*

ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Россия, Екатеринбург

Анизотропию можно определить, как зависимость свойств металла от выбранного в нем направления. Известно, что анизотропия металла определяется его текстурой. Под словом «текстура» понимают совокупность ориентировок кристаллов в поликристаллическом образце [1]. Однако это определение нельзя назвать полным, так как в металле могут помимо ориентировок кристаллитов, могут наблюдаться ориентировки зерен и даже дислокаций.

Текстуры по происхождению подразделяются на текстуры литья, текстуры деформации и текстуры рекристаллизации.

### 1. Текстуры литья меди

Текстуры литья, прежде всего, определяются расположением и формой зерен в затвердевшем металле. В работах [2,3] описано кристаллическое строение медной катанки, полученной методом непрерывного литья. По результатам проведенных экспериментов построены кривые упрочнения в ортогональных направлениях [4].

Показано, что анизотропия свойств литой медной заготовки сказывается на процессах формоизменения, в частности на уширении при волочении профилей прямоугольного сечения типа медных шин. Этот эффект проиллюстрирован рис.1, на котором показано относительное изменение ширины при осадке цилиндрических образцов перпендикулярно их образующей. Видно, что для литого анизотропного состояния показатель уширения оказывается меньшим, чем для изотропного горячедеформированного состояния.

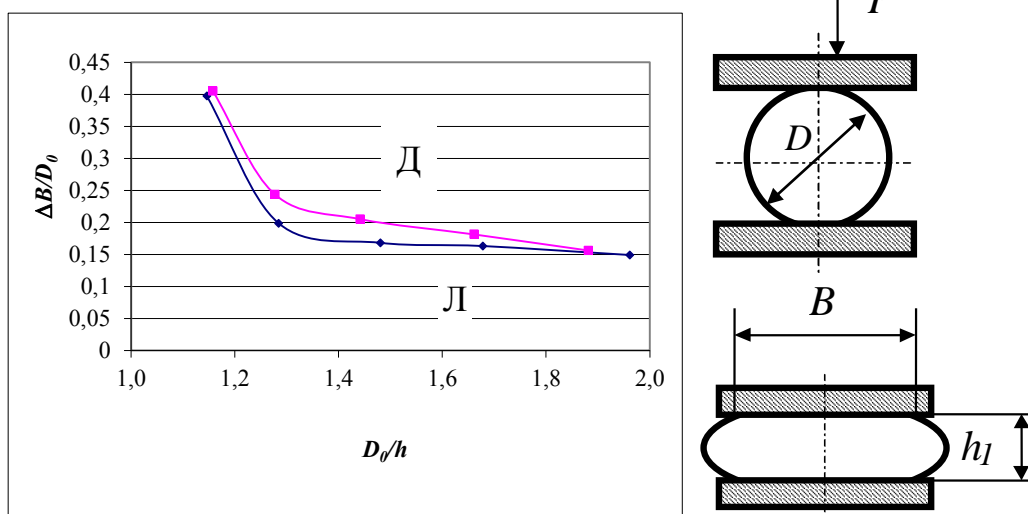


Рис.1. Относительное изменение ширины при осадке от коэффициента высотной деформации для медной проволоки, горячекатаной (Д) и литой (Л); справа – схемы деформации

Позже [5,6] было установлено, что на анизотропию свойств литой медной катанки накладывается их неравномерное распределение по поперечному сечению.

Для оценки свойств меди было произведено определение микротвердости в поперечном сечении катанки со сканированием вдоль радиуса. Показано, что распределение микротвердости имеет минимум в зоне столбчатых кристаллов. В зоне внутренних равноосных зерен микротвердость ниже, чем в приповерхностной зоне. Также довольно интересным фактом является достаточно большое различие микротвердости в соседних равноосных зернах, и соседних вытянутых зернах, которое невозможно объяснить погрешностью измерений.

Для описания поведения анизотропного металла катанки при деформации применена теория Хилла. Выполнен прогноз поведения заготовок из литой меди в операциях холодной обработки давлением.

## 2. Текстуры деформации меди

Однако анизотропия меди возникает и в процессе деформации. Текстуры, возникающие в проволоке при протягивании ее через волюки называются текстурами волочения. Они относятся

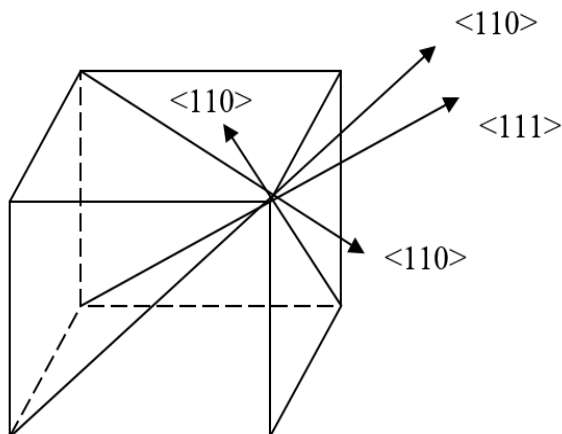


Рис.2. Формирование направления  $\langle 111 \rangle$  параллельно оси аксиальной текстуры для меди (ГЦК-решетка)

к аксиальным текстурам, которые характеризуются тем, что определенные кристаллографические направления располагаются вдоль оси проволоки. Медь, обладая ГЦК-ре-

шеткой, деформируется в направлениях  $\langle 110 \rangle$  наиболее плотной упаковки атомов, которые лежат в плоскостях граней куба. На рис. 2 показано формирование направления  $\langle 111 \rangle$  как результирующего направления текстуры в материалах с ГЦК – решеткой, к которым относится медь. Направления  $\langle 110 \rangle$  характеризуют диагонали трех граней куба.

Аксиальные текстуры возникают также в стержневых образцах при испытании на разрыв, причем как в равномерно растягивающейся части, так и в конусе течения [1]. По способу возникновения эти текстуры называются текстурами растяжения. С увеличением степени обжатия текстура волочения не только усиливается, но становится более четкой [1].

При степени деформации меди 60% различимы аксиальные текстуры  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ . При дальнейшем волочении все большее число кристаллов принимает эти ориентировки. В результате накопления деформации структурные составляющие все более вытягиваются в направлении волочения.

Медь относится к металлам, обладающим ГЦК – решеткой, для таких металлов текстуры волочения характеризуются образованием аксиальных текстур  $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ . Появляются две группы кристаллов: у одних параллельно оси проволоки располагается пространственная диагональ, у других — ребро куба. Соотношение ориентировок  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  в отдельных ГЦК - металлах может быть очень разным [2].

Судя по данным работы [7] в исходном (до деформации) состоянии доля ориентировок  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  и статистически случайных ориентировок примерно одинакова (каждая примерно 30 %). При волочении доля ориентировки  $\langle 111 \rangle$  возрастает за счет постоянного уменьшения доли случайных ориентировок. При деформации 97 % происходит резкое увеличение доли ориентировки  $\langle 111 \rangle$ .

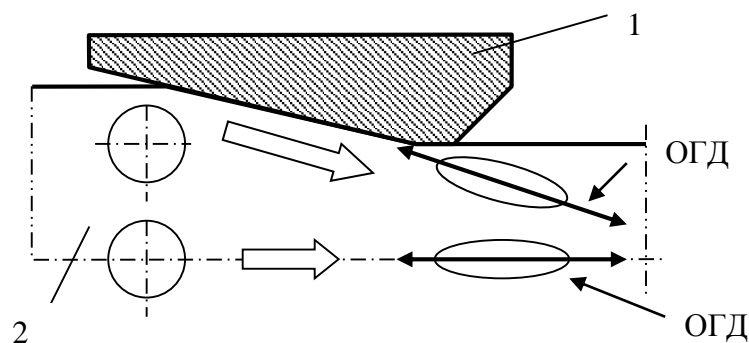


Рис.3. Схема разориентировки осей главных деформаций (ОГД) при волочении: ц – по центру; п – по периферии; 1 – волока; 2 - заготовка

Интересно отметить, что в исходном состоянии медной проволочной заготовки доля случайных ориентировок зависит от текущего радиуса измерения: по направлению к боковой поверхности доля таких ориентировок увеличивается. Особенно это заметно для проволоки, подвергнутой умеренным обжатиям. Это явление можно объяснить повышенными деформациями сдвига, локализованными вблизи именно боковой поверхности, что вызывает несовпадение оси главной деформации растяжения и оси проволоки. Изложенное поясняется рис.3, из которого видно, что если нанести координатную сетку в виде окружностей в продольном сечении проволоки, то после волочения окружности превратятся в эллипсы, но по центру заготовки их длинная ось будет совпадать с осью проволоки, а на периферии ось эллипса будет наклонена к продольной оси. Косвенным доказательством этого положения являются приведенные в [1] различия между текстурированным состоянием медной проволоки, протянутой многократно в одном и том же направлении и со сменой направления волочения

Аналогичные приведенным выше данным получены результаты в [8], где показано, что текстура тянутой медной проволоки состоит из ориентировок: ярко выраженной  $\langle 111 \rangle$  и слабой  $\langle 100 \rangle$ , однако их распределение по сечению проволоки неравномерно. В поверхностном слое происходит увеличение ориентировки  $\langle 100 \rangle$ .

Текстура прокатки является более сложной, чем аксиальная текстура проволоки и описывается не одной, а несколькими идеальными ориентировками, обладающие значительными областями рассеяния [9]. Идеальная ориентировка обозначается мил-

леровскими индексами плоскости, преимущественно совпадающей с плоскостью прокатки, и кристаллографического направления, совпадающего с направлением прокатки, например  $(100) [001]$ . Для меди было выявлено несколько идеальных ориентировок:  $(011)[2\bar{1}1]$ ,  $(112)[1\bar{1}1]$ ,  $(135)[5\bar{3}\bar{3}]$ ,  $(135)[2\bar{1}1]$ ,  $(011)[5\bar{3}\bar{3}]$  [1]. Надо отметить что, на вопрос какая из этих ориентировок наиболее правильно отражает реальную текстуру прокатанной меди, единого ответа нет. Однако существует ряд факторов, которые позволяют изменять текстуру листа. Такими факторами, согласно работе [1] являются: степень деформации или толщина листа, разница в обработке (текстура исходного состояния), степень чистоты и способ изготовления. Согласно работе [10] с увеличением степени деформации происходит усиление основных компонент текстуры прокатки  $\{135\} \langle 211 \rangle$ ,  $\{112\} \langle 111 \rangle$ ,  $\{011\} \langle 211 \rangle$ .

В этой работе также указано, что еще одним фактором, влияющим на текстуру в поверхностном слое медной полосы, является коэффициент трения: при коэффициенте трения 0,2 в поверхностных слоях возникает текстура  $(100) [011]$ , а при коэффициенте трения 0,5 появляется ориентировка  $(111) [110]$  (рис 4).

Текстура деформации оказывает большое влияние на упругие свойства, т.к. упругая деформация металлических кристаллов зависит от направлений приложения к ним нагрузки. Модуль

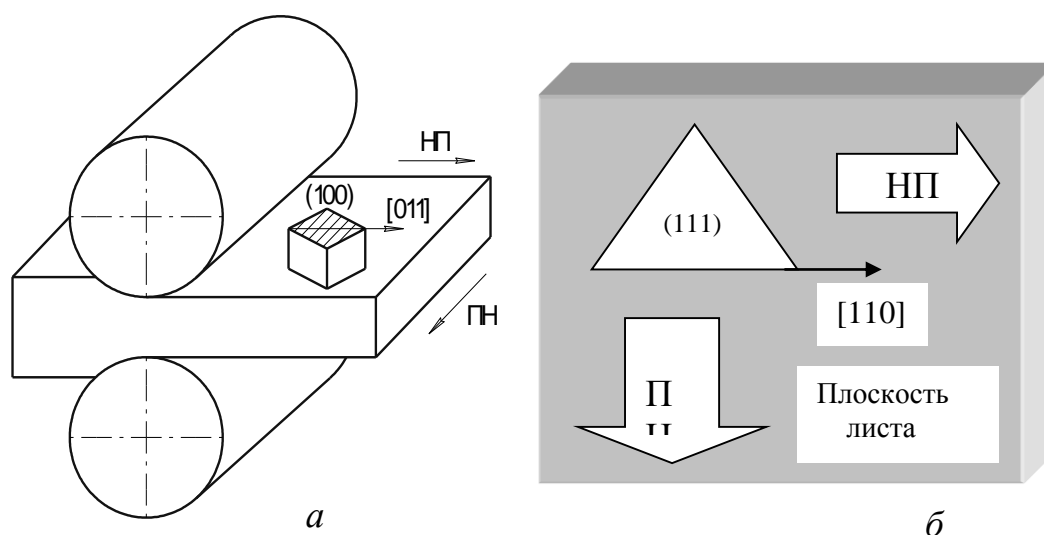


Рис. 4. Варианты формирования текстуры меди при прокатке:  
а – типа  $(100)[011]$ , б – типа  $(111)[110]$

упругости меди после холодной прокатки оказывается максимальным в поперечном и продольном направлениях (около 140 ГПа) и минимальным (около 110 ГПа) под углом  $45^\circ$  относительно направления прокатки [11]. Интересно отметить, что в общепотребительных справочниках приводится модуль упругости для меди, равный 115...125 ГПа, что может оказаться не совсем верным при выполнении точных расчетов.

Приведенные в книге [1] данные свидетельствуют о том, что при деформации меди существует критическая величина деформации, при которой возможно ожидать снижения прочностных характеристик, однако при повышении уровня деформации металл вновь начинает упрочняться. Эта величина зависит от угла разворота образца относительно оси прокатки. Наименьшие значения временного сопротивления достигаются при относительном обжатии 94 % (в интервале 75...98 %) и угле разворота образца  $45^\circ$ .

Если сравнить эти данные, то окажется, что закономерности анизотропии модуля упругости и временного сопротивления похожи: зависимости имеют минимум при угле разворота образца  $45^\circ$  по отношению к оси удлинения.

Относительное удлинение листовой меди достигается наибольшим в направлении прокатки НП и слегка падает в поперечном направлении ПН, наименьшие значения достигаются при угле разворота образцов  $45^\circ$ . При этом разница в величинах оказывается на уровне 5...8%.

Если для стали или титана при прокатке листов часто необходимо получать заведомо текстурованные материалы, в которых наблюдается большая анизотропия свойств, то для меди в ряде случаев необходимо получение не текстурованного металла. В частности в патенте [12] описан способ получения медных покрытий с полностью разупорядоченной текстурой. Причем такие листовые покрытия по электрическим свойствам превосходят текстурированные. Таким образом, в практике металлообработки все большее внимание уделяется не только контролю текстуры в изделиях из меди, но и получение изделий с заранее прогнозируемой текстурой.

Одним из самых быстроразвивающихся процессов в обработке металлов давлением для достижения больших степеней деформаций является равноканальное угловое прессование (РКУ). РКУ-прессование применяют и для прессования меди, причем все большее внимание уделяется изучению микроструктуры и

текстуры во время процессов. Авторами работ [13,14] описывается эволюция зеренной и кристаллографической текстуры во время РКУ-прессования, а также разработаны теоретические методы прогнозирования этой эволюции.

### **3. Текстуры рекристаллизации меди**

Текстура отжига тянутой проволоки из меди высокой чистоты согласно [1, 15-17] состоит из трех ориентировок [100], [111] и [112]. Причем при средних степенях деформации формируется в основном одинарная волокнистая текстура [112]. При увеличении степени деформации происходит формирование двойной волокнистой текстуры [100] и [111]. Однако в изделиях из меди не всегда при отжиге формируется волокнистая текстура. В частности по материалам [18] в медных соединителях (интерконнекторах) после отжига волокнистая текстура не образуется из-за неоднородности распределения в них напряжений при деформации. Аналогичной тематике посвящена статья [19]. Результаты исследования влияния толщины медных пленок на эволюцию их микроструктуры при отжиге приведены в работе [20].

В продольном и поперечном направлении модуль упругости медного листа равен 70 ГПа (что на 40 % меньше значения, обычно приводимого в справочниках), а под углом  $45^\circ$  – 120 ГПа [11]. Таким образом, зависимость модуля упругости от угла определения этой величины является обратной по отношению к такой же зависимости для холоднокатаного состояния. Это наводит на мысль, что, подбирая степень деформации при прокатке можно добиться такого состояния листа, при котором модуль упругости окажется константой.

В отожженном листе меди с кубической текстурой наблюдаются три наибольших значения временного сопротивления под углами 0,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , а ярковыраженный максимум удлинения – под углом  $45^\circ$  [1]. Предел текучести и предел усталости при изгибе имеет такую же зависимость от направления, как и временное сопротивление.

В производстве проволоки из меди желательно достижение больших степеней деформации (до 99%) при пониженной температуре рекристаллизации. Чаще всего с повышением степени деформации температура рекристаллизации снижается. Однако для электролитической меди до степени деформации 80% происходит снижение температуры рекристаллизации, а затем она резко идет вверх (рис. 5).

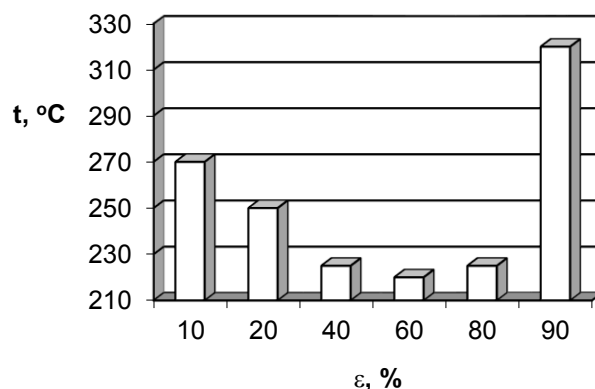


Рис. 5. Зависимость температуры начала рекристаллизации меди от степени предшествующей деформации

Автор публикации [15] объясняет это явление с позиции анализа кристаллографической текстуры. Рекристаллизованная проволока из меди высокой чистоты, полученная при средних степенях деформации, имеет волокнистую текстуру [112], а при очень больших степенях холодной деформации — двойную волокнистую текстуру [100] и [111]. Рекристаллизация, приводящая к волокнистой текстуре [112], протекает более интенсивно, чем процессы, приводящие к волокнистой текстуре [100] и [111], причем волокнистая текстура [111] создается труднее, чем [100]. Температура начала рекристаллизации возрастает в последовательности [112], [100] и [111]. Образование текстуры рекристаллизации зависит от особенностей текстур деформации. Текстура деформации ориентации [100] и [110] в плоскости прокатки затрудняет развитие рекристаллизации с текстурой [112] и облегчает формирование рекристаллизации структуры с текстурой [100] и [111], что является причиной повышения температуры начала рекристаллизации меди с увеличением степени холодной деформации.

Как отмечается в книге [11], на текстуру рекристаллизации меди очень сильно влияют примеси, даже в малых количествах. Добавки в медь алюминия до 0,2% и кадмия до 0,1% приводят к образованию текстуры куба, тогда как введение 0,0025 % фосфора в медь чистотой 99,99 % эту текстуру подавляет. В то же время на текстуру деформации такое действие микролегирование не оказывает.

Если рассмотреть совместное влияние деформации и термообработки, то можно заметить, что текстура подвергается изменению в соответствии с схемой рис.6. Как видно из рис. 6, создаются возможности изменения текстуры в результате волочения и отжига в интервале  $\langle 112 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ .



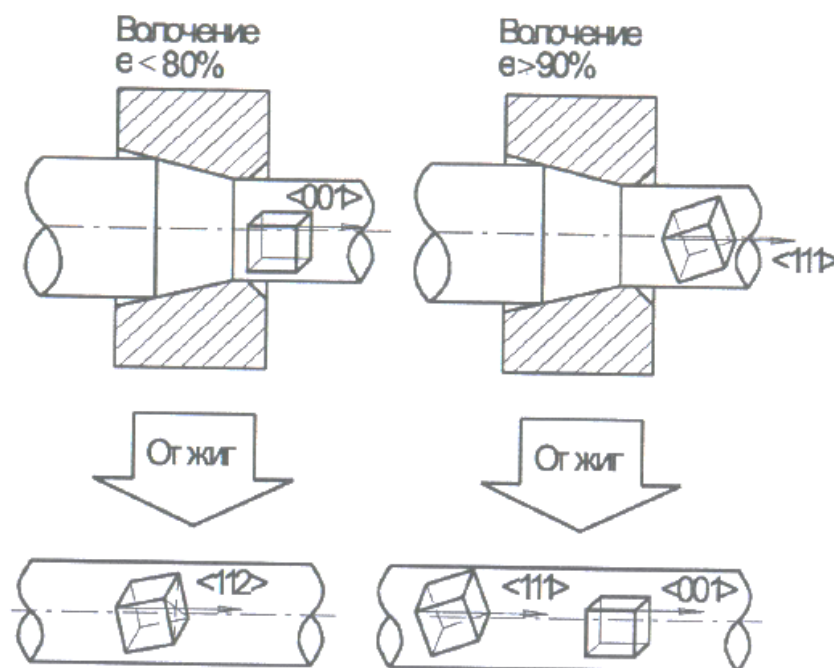


Рис. 6. Изменение текстуры меди в результате волочения и отжига

## Выводы

Приведенный в работе обзор возможных вариантов текстурообразования в полуфабрикатах из меди показывает необходимость изучения и контроля анизотропии заготовок на стадии обработки и конечных изделий. Это же самое подтверждает и зарубежный опыт развития науки и технологии: все большее количество научных работ направлены на осуществление контроля анизотропии меди, а также на получение изделий с контролируемой текстурой и, как следствие, с предсказуемыми свойствами.

## Библиографический список

1. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. М.: Металлургия, 1969. 655 с.
2. Логинов Ю.Н., Мальцева Л.А., Вырлина Л.М., Копылова Т.П. Проблемы применения медной катанки в кабельной промышленности. Кабели и провода, 2001, №2(267). С.14-16.
3. Логинов Ю.Н., Мальцева Л.А., Вырлина Л.М., Копылова Т.П. Анизотропные свойства непрерывнолитой медной катанки электротехнического назначения. Цветные металлы, 2002, №4. С.73-77.
4. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.

5. *Логинов Ю.Н., Котов В.В.* Влияние неоднородности и анизотропных свойств литой меди на процесс деформации трубных заготовок/ Достижения в теории и практике трубного производства, Екатеринбург, 2004. С.252-259.
6. *Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Котов В.В.* Изучение связи между дифференциальными и интегральными прочностными характеристиками металлов/Разрушение и мониторинг свойств металлов. Материалы международной конференции (Екатеринбург, 26-30 мая 2003г). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. CD, статья 96.
7. *Иванова С., Станоевич Б., Маркович Д.* Влияние высоких степеней деформаций на текстуру медной проволоки // Цветные металлы, 2002, № 2. С. 71-73.
8. *Park H., Lee D.N.* The Evolution of Annealing Textures in 90 Pct Drawn Copper Wire // Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, Vol. 34 Num. 3. P. 531-541(11).
9. *Бородкина М.М., Спектор Э.Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 272 с.
10. *Ватрушин Л.С., Осинцев В.Г., Козырев А.С.* Бескислородная медь. М.: Металлургия, 1982. 192 с.
11. *Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К.* Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584с.
12. Патент США № 6333120. Method for controlling the texture and microstructure of plated copper and plated structure. Apl. International Business Machines Corporation. P. W. DeHaven, P. S. Locke, K. P. Rodbell, C. E. Uzoh. Заявл. 27.08.1999. Оpubл. 25.12.2001. МКИ<sup>7</sup> В32В 15/00.
13. Evolution of Crystallographic Texture during Equal Channel Angular Extrusion of Copper: The Role of Material Variables / Satyam Suwas, Roxane Arruffat-Massion, Laszlo S. Toth, Jean-Jacques Fundenberger, Andre Eberhardt, Werner Skrotzki. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, Vol. 37 Num. 3. P. 739-753(15).
14. Non-uniform microstructure and texture during equal channel angular extrusion / I.J. Beyerlein, S. Li, C.T. Necker, D.J. Alexander, C.N. Tome. Philosophical Magazine, 2005, Vol. 85 Num. 13. P. 1359-1394(15).
15. *Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В.* Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 272 с.
16. Влияние холодной деформации на упругость и пластичность волооченной и эмалированной медной проволоки / Д. Маркович, Д. Гускович, Б. Станоевич, А. Илич. Металлы, 1993, №4. С. 137-140.
17. *Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.* Рентгенографический и электронографический анализ металлов. М.: Металлургия, 1963. 256 с.
18. *Lee H.J., Han H.M., Lee D.N.* Annealing Textures of Copper Damascene Interconnects for Ultra-Large-Scale Integration//Journal of Electronic Materials, 2005, Vol. 34 Num. 12. P. 1493-1499(7).
19. *Lee D.N., Lee H.J.* Effect of Stresses on the Evolution of Annealing Textures in Cu and Al Interconnects // Journal of Electronic Materials, 2003, Vol. 32 Num. 10. P. 1012-1022(11).
20. Effect of Film Thickness on the Evolution of Annealing Texture in Sputtered Copper films / N.J. Park, D.P. Field, M.M. Novell, P.R. Besser. Journal of Electronic Materials, 2005, Vol. 34 Num. 12. P. 1493-1499(7).